

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА**

В. Г. Воропай, В. М. Гаряжа, Д. В. Рум'янцев

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання розрахунково-графічної роботи
«Графіки навантажень, температурний режим
та навантажувальна здатність трансформаторів»

з курсу

«ЕЛЕКТРИЧНА ЧАСТИНА СТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ»

*(для студентів 3, 4 курсів денної і 4 курсу заочної форм навчання напряму
6.050701 «Електротехніка та електротехнології» (0906 «Електротехніка»)
зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання»)*



Харків ХНАМГ 2010

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи «Графіки навантажень, температурний режим та навантажувальна здатність трансформаторів» з курсу «Електрична частина станцій та підстанцій» (для студентів 3, 4 курсів денної і 4 курсу заочної форм навчання напряму 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» (0906 «Електротехніка») зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: В. Г. Воропай, В. М. Гаряжа, Д. В. Рум'янцев. – Х.: ХНАМГ, 2010. – 22 с.

Укладачі: ст. викл. В. Г. Воропай,
доц. В. М. Гаряжа,
ас. Д. В. Рум'янцев

Рецензент: доц. Є. Д. Дьяков

Рекомендовано кафедрою електропостачання міст,
протокол № 2 від 25.10.2010 р.

Загальні вказівки

Одним із змістових модулів при вивченні студентами навчального напрямку "Електротехніка" курсу "Електрична частина станцій та підстанцій" є виконання розрахунково-графічної роботи "Графіки навантажень, температурний режим та навантажувальна здатність трансформаторів". Ця робота дає можливість студентам оцінити вплив зміни навантаження на величину зношення силових трансформаторів, набутти вміння його розрахунку.

В роботі необхідно побудувати графіки навантаження заданих споживачів і їх сумарний графік, визначити параметри, які характеризують графіки; згідно з сумарним графіком навантаження розрахувати перевищення температури масла і обмотки, а також зношення трансформатора в заданих умовах експлуатації; побудувати залежності перевищення температури масла і обмотки від навантаження, а також температури обмотки від навантаження.

Вихідні дані для виконання розрахунково-графічної роботи вибираються відповідно до останньої цифри номера залікової книжки студента і визначаються за табл. А1 і А3 додатку А. Дані табл. А1 множать на коригувальний коефіцієнт (табл. А2), що визначається за передостанньою цифрою залікової книжки:

$$P_{\text{макс}} = K_p \times P'_{\text{макс}}; \cos \varphi = K_c \times \cos \varphi'$$

Оформлення роботи повинне відповідати вимогам діючих нормативних документів, зразок титульного аркуша наведений в додатку Б.

1. Теоретичні положення

Графік навантаження – це крива зміни навантаження в функції часу. По осі абсцис відкладається час, по осі ординат – відповідне часові навантаження.

Для характеристики навантаження будують графіки активних навантажень (P , кВт), реактивних (Q , квар), повних (S , КВА). Її будують для періоду часу – добові або річні і для певного місця в системі: на шинах у споживача, на підстанції або на шинах станції чи системи в цілому. Річні графіки будують за

характерними добовими для зимових, весняно-осінніх і літніх днів. При цьому ординати графіків розташовують вздовж осі абсцис від 0 до 8760 в порядку зменшення їх значень. Такі графіки називаються графіками за тривалістю. Площа річного графіку у визначеному масштабі відповідає річному споживанню електроенергії W , а площа добового графіка – добовому.

Для багатьох споживачів на основі досвіду експлуатації отримані *типові графіки навантаження*. Навантаження в таких графіках задається в відносних одиницях (%) від максимального навантаження. Типові графіки наводяться в довідковій літературі. У загальному випадку їх необхідно уточнювати стосовно до конкретного об'єкту.

Графіки будують на основі розрахунків чи за показами приладів. Точки, нанесені в системі координат, з'єднуються між собою ламаними або ступінчастими лініями. Зручніше користуватися ступінчастими графіками, але при їх формуванні слід враховувати такі умови:

1. Навантаження в характерних точках (мінімум, максимум) повинні мати реальні значення;
2. Оскільки площа, обмежена графіком, пропорційна спожитій електроенергії, то і для плавного, і для ступінчастого графіку вона повинна бути однаковою;

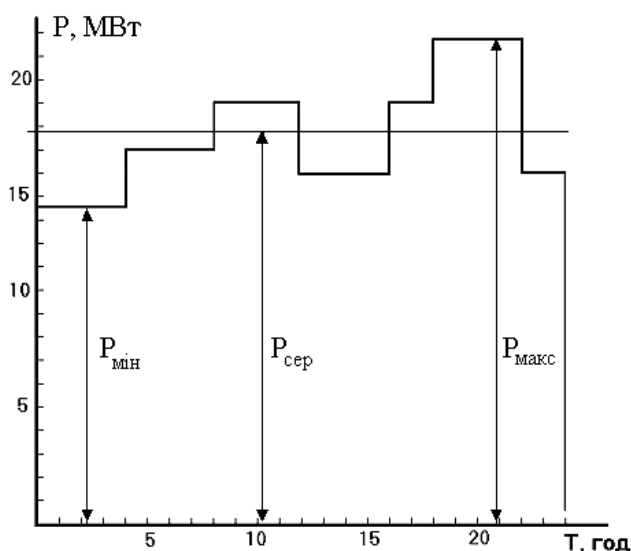


Рис. 1. Добовий графік навантаження

3. Протягом ступеня навантаження вважають незмінним.

Електричне навантаження може контролюватись візуально за показниковими, або реєструючими приладами.

Характерними величинами добового графіку (Рис. 1) є *максимальне навантаження* $P_{\text{макс}}$; *мінімальне* $P_{\text{мін}}$, а також *середньодобове* – $P_{\text{сер}}$.

Крім того, показником є коефіцієнт нерівномірності навантаження $K_n = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$.

Енергія, спожита за визначений період

$$W = \sum_{i=1}^n P_i \times t_i, \quad (1)$$

де n – кількість ступенів графіка;

P_i – навантаження i –ого ступеня;

t_i – тривалість i –ого ступеня.

Середнє навантаження за період, що розглядається

$$P_{\text{сер}} = \frac{W}{T}, \quad (2)$$

де T – тривалість періоду.

Ступінь рівномірності графіка навантаження характеризує коефіцієнт заповнення.

$$K_{\text{зап}} = \frac{P_{\text{сер}}}{P_{\text{макс}}} = \frac{W_{\text{доб}}}{24P_{\text{макс}}}. \quad (3)$$

Ефективність використання встановленої потужності характеризує коефіцієнт використання встановленої потужності

$$K_{\text{вик}} = \frac{P_{\text{сер}}}{P_{\text{вст}}} = \frac{W}{P_{\text{вст}}} \quad (4)$$

Час використання максимуму навантаження визначають за формулою

$$T_{\text{макс}} = \frac{W}{P_{\text{макс}}} \quad (5)$$

Коефіцієнт резерву

$$K_{рез} = \frac{P_{вст}}{P_{макс}}. \quad (6)$$

Річний графік за тривалістю будують за характерними добовими графіками (частіше за двома: зимовим і літнім). Тривалість роботи за зимовим графіком приймають 183 дні, а за літнім – 182 дні. Побудова річного графіку за тривалістю показана на Рис. 2.

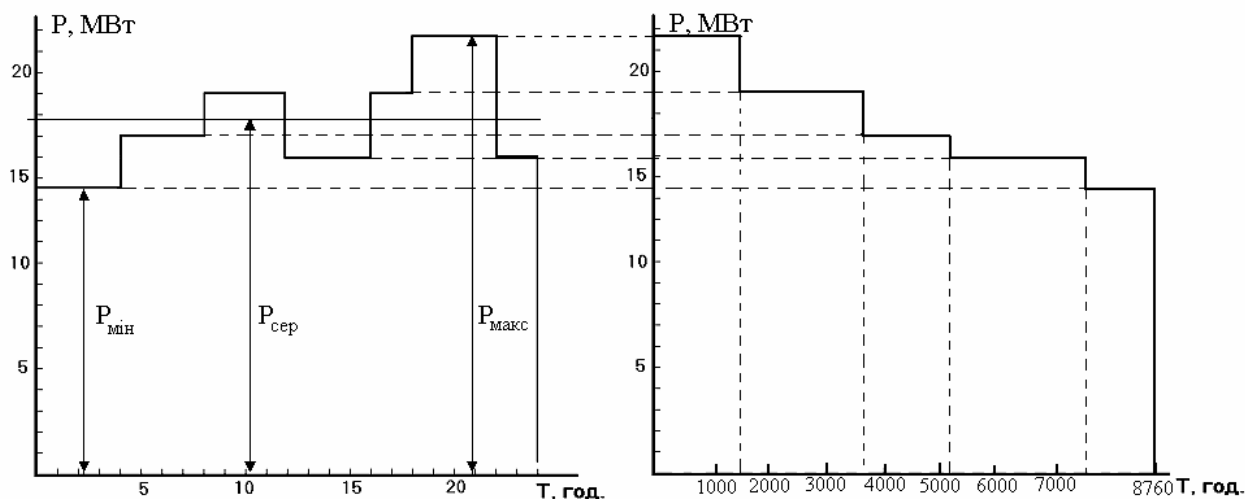


Рис. 2 - Побудова річного графіка за тривалістю

Час максимальних втрат τ залежить від тривалості використання максимуму активного навантаження. Ця залежність виражається формулою

$$\tau = 2T_{макс} - 8760 + \frac{8760 - T_{макс}}{1 + \frac{T_{макс}}{8760} - 2\frac{P_{мін}}{P_{макс}}} \left(1 - \frac{P_{мін}}{P_{макс}} \right)^2. \quad (7)$$

Розрахунок часу максимальних втрат для типових графіків навантаження можна виконувати також за формулою

$$\tau = \left(0.124 + \frac{T_{макс}}{10000} \right)^2 \times 8760. \quad (8)$$

Більш точною є формула (7).

В умовах експлуатації робота трансформатора з тривало незмінним навантаженням малоімовірна, проте для можливості контролю режиму його роботи введено поняття *номінального режиму*, при якому навантаження трансформатора відповідає вказаним заводським даним (потужність, струм, напруга, частота, максимальна температура повітря). У цьому режимі трансформатор може працювати скільки завгодно.

Розрізняють допустимі навантаження і допустимі перевантаження трансформатора. Якщо режим роботи не прискорює старіння ізоляції і термін її служби залишається відповідним номінальному режиму, режим допускається необмежено довгим і називається *допустимим тривалим навантаженням*.

Режим, що викликає прискорений знос і скорочення терміну служби ізоляції, називається *перевантаженням*. Якщо при перевантаженні температура найбільш нагрітої точки у трансформаторі не перевищує небезпечного значення, вона вважається *допустимою*.

У режимі систематичного навантаження зношення ізоляції трансформатора за період, що розглядається (доба, рік) дорівнює номінальному зносу. Максимальне навантаження не повинне перевищувати $1.5 S_{\text{ном.тр}}$, температура масла у верхніх шарах не повинна перевищувати 95°C , а температура обмотки не повинна перевищувати 140°C .

У режимі аварійних перевантажень максимальне навантаження не повинне перевищувати $2.0 S_{\text{ном.тр}}$, температура масла у верхніх шарах не повинна перевищувати 115°C , температура в найбільш нагрітій точці обмотки трансформаторів номінальною напругою до 110 кВ включно не повинна перевищувати 160°C , а трансформаторів номінальною напругою вище 110 кВ – 140°C . Такий режим допускається у виняткових випадках протягом обмеженого часу.

Якщо температура обмотки на будь-якому ступені досягає вказаних значень, або більша, то трансформатор в такому режимі працювати не може, необхідне його розвантаження, чи застосування трансформатора більшої потужності.

Сукупність всіх допустимих навантажень і перевантажень трансформатора визначає його *навантажувальну здатність*.

В основі розрахунку навантажувальної здатності лежить теплове зношення ізоляції трансформатора. Під впливом температури і низки інших чинників фізико-хімічні властивості твердої ізоляції з часом зазнають зміни, при цьому ізоляція стає крихкою. Хоча електрична міцність її практично не знижується, вона більше не здатна витримувати механічні навантаження від вібрацій або коротких замикань. Цей незворотний процес називається старінням. Швидкість старіння ізоляції залежить від температури, а досягнутий ступінь старіння - від температури і часу її дії.

Для розрахунку навантажувальної здатності потрібно визначити температуру в найбільш нагрітих місцях обмотки, а також залежність швидкості старіння ізоляції від температури і температуру, при дії якої трансформатор працюватиме заданий, економічно виправданий термін.

Розрахунок температури найбільш нагрітої точки обмотки $T_{об}$ зводиться до визначення величини, на яку температура верхніх шарів масла перевищує температуру охолоджуючого середовища θ_m а температура найбільш нагрітої точки обмотки – температуру масла при несталих режимах нагрівання $\theta_{нб.об.}$, а також незмінній температурі охолоджуючого середовища, еквівалентній тій, що природно змінюється.

Встановлено, що для трансформаторів справедливе співвідношення $\theta_m \sim \Delta P^m$, де ΔP - втрати потужності в трансформаторі, тобто номінальні втрати

$$\text{потужності } \Delta P_{ном} = \Delta P_x + \Delta P_\kappa = \Delta P_x \left(1 + \frac{\Delta P_\kappa}{\Delta P_x} \right) = \Delta P_\kappa (1 + d),$$

а втрати з урахуванням завантаження $\Delta P = \Delta P_x + \Delta P_\kappa K^2_n = \Delta P_x (1 + dK^2_n)$.

Тоді усталене перевищення температури масла над температурою навколишнього середовища визначатиметься як

$$\theta_m = \theta_{м.ном.} \left(\frac{1 + dK^2_n}{1 + d} \right)^x, \quad (9)$$

де ΔP_{κ} і ΔP_x – паспортні втрати активної потужності в сталі і міді трансформатора відповідно;

$$d = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_x}; \quad (10)$$

$\theta_{\text{м.ном.}}$ – перевищення температури масла у верхніх шарах над температурою охолоджуючого середовища;

$$K_n = \frac{S}{S_{ном}} - \text{відносне навантаження трансформатора.}$$

Для перевищення температури обмотки в найбільш нагрітій точці над температурою масла $\theta_{об.}$ справедливе співвідношення

$$\theta_{o\tilde{o}.} = \theta_{o\tilde{o}.H.} \left(\frac{\Delta P_{o\tilde{o}M}}{\Delta P_K} \right)^y = \theta_{o\tilde{o}.H.} \times K^y_H, \quad (11)$$

де $\theta_{об.н.}$ - перевищення температури найбільш нагрітої точки масла при номінальному навантаженні.

Відповідно до ГОСТ 14209-97 $x = 0.9, y = 1.6, \theta_{м.ном.} = 55^{\circ} \text{ C}, \theta_{об.н.} = 23^{\circ} \text{ C}$ для трансформаторів з системами охолодження М і Д і $x = 1.0, y = 1.8, \theta_{м.ном.} = 40^{\circ} \text{ C}, \theta_{об.н.} = 38^{\circ} \text{ C}$ – для трансформаторів з системами охолодження Ц і ДЦ.

При нерівномірному графіку навантаження трансформатора його тепловий режим безперервно змінюється, причому закони зміни температури масла і температури обмотки відрізняються один від одного.

Розглянемо багатоступінчастий графік навантаження трансформатора. Для перевищень температури масла у верхніх шарах можна записати (індекси M опущені)

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \theta_0 + (\theta_{1_y} - \theta_0)(1 - e^{\Delta t_1 \tau}) \\ \theta_2 &= \theta_1 + (\theta_{2_y} - \theta_1)(1 - e^{\Delta t_2 / \tau}) \\ &\dots \\ \theta_n &= \theta_{n-1} + (\theta_{n_y} - \theta_{n-1})(1 - e^{\Delta t_n / \tau}),\end{aligned}\tag{12}$$

де $\theta_{1y}, \theta_{2y}, \dots, \theta_{ny}$ – сталі перевищення температури масла у верхніх шарах, відповідно при навантаженнях K_1, K_2, \dots, K_{ny} ;

τ - постійна часу нагріву трансформатора.

Постійні часу нагріву трансформаторів повинні наводитися в паспорті. За відсутності таких даних слід приймати значення теплових постійних:

$\tau = 3$ год. для трансформаторів системами охолодження М і Д;

$\tau = 2$ год. для трансформаторів системами охолодження ДЦ і Д.

Для трансформаторів, випущених до 1975 р., рекомендується приймати теплові постійні часу нагрівання, наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Значення теплових постійних часу нагріву трансформаторів

Система охолодження	Потужність трансформатора, кВА	Вища напруга, кВ	Значення постійної часу Т, год.
М, Д	До 6300 включно	До 10 кВ включно	2.5
М, Д	Від 10000 до 40000 включно	35	3.0
М, Д	Більше 40000	35	2.0
М, Д	Від 2500 до 25000 включно	110	3.0
М, Д	Більше 25000	110	2.0
ДЦ, Ц	Більше 25000	Більше 110	1.5

Розв'язання системи рівнянь (12) дозволяє знайти початкове перевищення температури масла θ_0 і перевищення температури масла θ_x в кінці будь-якого ступеня n .

Постійна часу нагріву обмоток значно менша постійної часу нагріву трансформатора і складає декілька хвилин. Тому можна вважати, що при ступінчастій зміні навантаження температура обмотки в найбільш нагрітій точці в момент зміни навантаження міняється стрибком від одного сталого значення до іншого, а далі змінюється відповідно до зміни температури масла.

На основі результатів розрахунку температури обмотки прийнято визначати відносне зношення ізоляції трансформатора. Відповідно до [5] прийнято, що при підвищенні температури ізоляції на 6 °С термін служби її або зношення зменшується удвічі в порівнянні з нормальним добовим зношенням при температурі найбільш нагрітої точки обмотки, рівній 98 °С. При цьому використовують розрахункові формули

$$F_{*i} = 2^{\frac{v_{об.і}-98}{6}} \quad (13)$$

$$F_{доб.} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \times t_i}{24}, \quad (14)$$

де $v_{об.м}$ – температура ізоляції обмотки в найбільш нагрітій точці,
 $v_{об.м} = \theta_{м} + \theta_{об.} + T_{ох.}$;

F_{*i} і $F_{*доб.}$ – відповідно відносно зношення ізоляції на даному ступені графіка навантаження і в цілому за добу (діб);

$T_{ох.}$ – еквівалентна температура охолоджуючого середовища, °С.

Розрахунок зношення за вищенаведеною методикою досить об'ємний, тому поряд з точними отримали застосування розрахунки за таблицями, складеними для двоступінчатого графіку добового навантаження з параметрами K_1 , K_2 і h . Для визначення вказаних параметрів заданий добовий графік повинен бути перетворений в еквівалентний (відносно зношення) двоступінчатий.

Попередньо потужність силових трансформаторів з урахуванням припустимого аварійного перевантаження 40% понад номінальне значення знаходять за формулою

$$S_{н.т.} \geq \frac{S_{макс}}{1.4}, \quad (15)$$

де $S_{макс}$ – максимальне повне навантаження підстанції, МВА.

Визначену потужність округляють до стандартного значення. Потім на заданому графіку проводять горизонтальну лінію з ординатою, яка дорівнює $S_{н.т.}$, тобто лінію номінального навантаження.

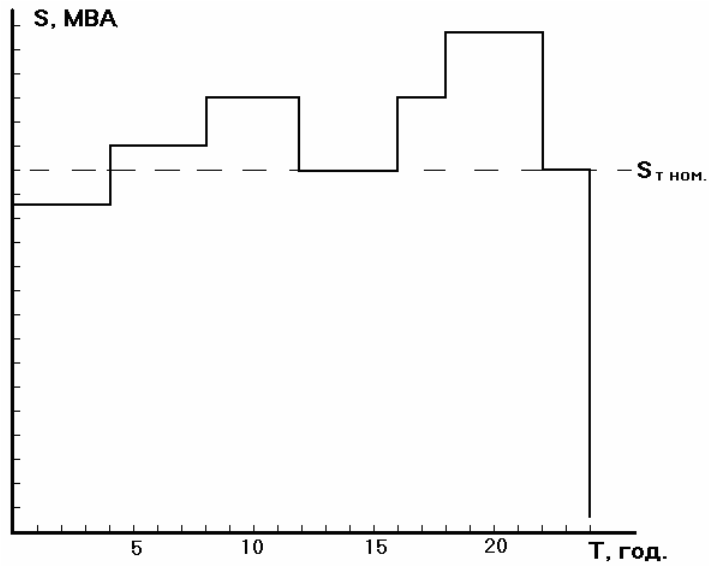


Рис. 3 – Графік навантаження підстанції

Пересіканням цієї лінії з графіком утворюється дві ділянки – де $S_i \leq S_{т ном}$ і де $S_i > S_{т ном}$.

Коефіцієнт початкового навантаження еквівалентного графіка визначають за виразом

$$K_1 = \frac{1}{S_{Тном}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m S_i^2 \times \Delta t_i}{\sum_{i=1}^m \Delta t_i}} \quad (16)$$

де Δt_i – тривалість ступеня потужністю $S_i \leq S_{т ном}$,

m – кількість ступенів

Попереднє значення коефіцієнта K_2 визначають за виразом

$$K_2' = \frac{1}{S_{Тном}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n S_i^2 \times \Delta h_i}{\sum_{i=1}^n \Delta h_i}} \quad (17)$$

де Δh_i – тривалість ступеня потужністю $S_i > S_{т ном}$,

n – кількість ступенів.

Далі попереднє значення K_2' порівнюється із значенням $K_{\max} = S_{\max} / S_{\text{ном}}$ вихідного графіка.

Якщо $K_2' < 0.9 K_{\max}$, то приймають $K_2 = 0.9 K_{\max}$, а тривалість перевантаження коригують за формулою

$$h = ((K_2')^2 \times h') / (0.9 \times K_{\max})^2, \quad (18)$$

де h' – тривалість перевантаження вихідного графіка.

Якщо $K_2' \geq 0.9 K_{\max}$, то приймають $K_2 = K_2'$.

Зношення ізоляції F_{*i} можна визначити за табл. П4.15 – П4.31 [1], в яких

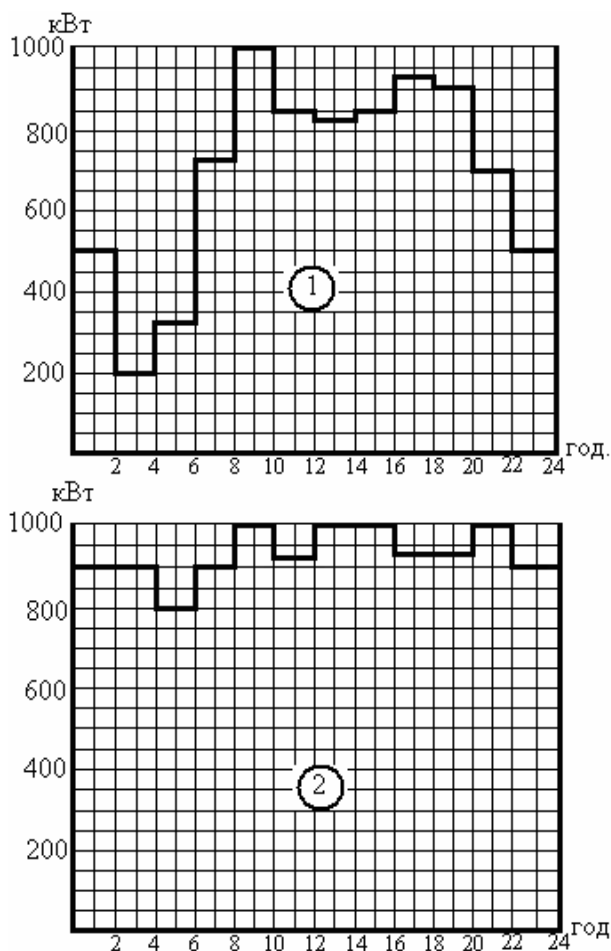


Рис. 4. Графік навантаження споживачів

наведені значення відносного зношення ізоляції при температурі навколишнього середовища $+20^{\circ}\text{C}$. Визначена за таблицями П4.19-П4.31 величина зношення множить на коефіцієнт f (табл. П4.15 [1]), що коректує відносне зношення виткової ізоляції трансформаторів при аварійних перевантаженнях згідно з температурою навколишнього середовища.

2. Приклад виконання розрахунково – графічної роботи

Вихідні дані: Навантаження першого

споживача – 1000 кВт, $\cos \varphi = 0.98$;

Навантаження другого споживача – 1000 кВт, $\cos \varphi = 0.98$;

Графіки навантаження наведені на рис. 4 (графіки 1 і 2).

Еквівалентна зимова температура навколишнього середовища – мінус 6°C .

2.1. Побудова сумарного графіка і визначення параметрів графіків

Спільний графік навантаження будують додаванням ординат двох графіків, виражених в іменованих одиницях (графік 3).

Для першого споживача: $P_{\max}=1000$ кВт, $P_{\min}=200$ кВт, коефіцієнт нерівномірності навантаження $K_n = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{200}{1000} = 0.2$; електроенергія, спожита за добу

$$W = \sum_{i=1}^n P_i \times t_i = 500 \times 2 + 200 \times 2 + 325 \times 2 + 725 \times 2 +$$

$$+ 1000 \times 2 + 850 \times 2 + 825 \times 2 + 850 \times 2 + 925 \times 2 + 900 \times 2 + 700 \times 2 + 500 \times 2 = 16600 \text{ кВт} \times \text{год.}$$

Середнє навантаження за добу складає

$$P_{cp} = \frac{W}{T} = \frac{16600}{24} = 691.7 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт заповнення графіка

$$K_{зап} = \frac{P_{cp}}{P_{\max}} = \frac{W_{сут}}{24 P_{\max}} = \frac{691.7}{1000} = \frac{16600}{24 \times 1000} = 0.69.$$

Час використання максимуму навантаження за добу

$$T_{\max}^{доб} = \frac{W}{P_{\max}} = \frac{16600}{1000} = 16.6 \text{ год.}$$

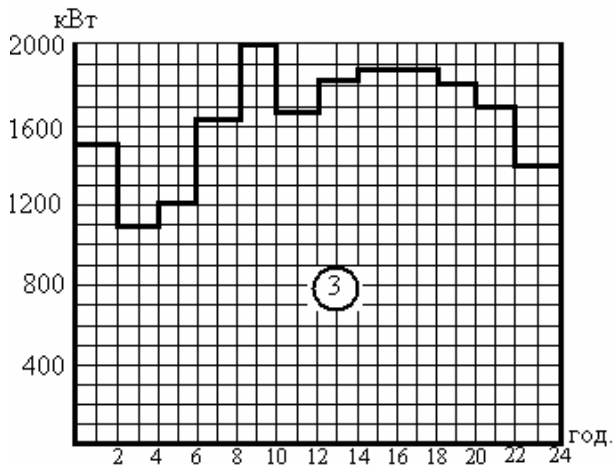


Рис. 5. Сумарний графік навантаження

Річний час використання максимуму на-

вантаження $T_{\max} = 16.6 \times 365 = 6059$ год.

Для другого споживача: (розрахунки виконують аналогічно).

$P_{\max} = 1000$ кВт, $P_{\min} = 800$ кВт, $K_n = 0.8$, $W = 22350$ кВт×год., $P_{cp} = 931.25$ кВт,

$K_{зап} = 0.93$, $T_{\max}^{доб} = 22.35$ год., $T_{\max} = 8158$ год.

Для підстанції в цілому: $P_{\max} = 2000$ кВт, $P_{\min} = 950$ кВт, $K_n = 0.475$,

$W = 38950$ кВт×год, $P_{cp} = 1623$ кВт, $K_{зап} = 0.81$, $T_{\max}^{доб} = 19.48$ год., $T_{\max} = 7110$ год.

$$\text{Для сумарного графіка } \tau = 2 \times 7110 - 8760 + \frac{8760 - 7110}{1 + \frac{7110}{8760} - 2 \times \frac{950}{2000}} \left(1 - \frac{950}{2000} \right)^2 = 5988 \text{ год.}$$

2.2. Розрахунок температурного режиму та зносу трансформаторів

Згідно з сумарним графіком навантаження (Графік 3, Рис. 5) максимальна величина навантаження підстанції складає 2000 кВт (2.0 МВА). Коефіцієнт потужності навантаження дорівнює 0.98.

Максимальна повна потужність навантаження

$$S_{\max} = \frac{P_{\max}}{\cos \varphi}$$

$$S_{\max} = \frac{2.0}{0.98} = 2.04 \text{ МВА}$$

Потужність силових трансформаторів попередньо визначають за формулою (15):

$$S_{\text{ном.тр.}} = \frac{2.04}{1.4} = 1.43 \text{ МВА}$$

Приймаємо номінальну потужність трансформатора $S_{\text{т.ном.}} = 1,6 \text{ МВА}$. Тип трансформатора ТМН 1600/35, для цього трансформатора $\Delta P_{\kappa} = 26 \text{ кВт}$, $\Delta P_x = 5.1 \text{ кВт}$, $\tau = 3 \text{ год.}$, $\theta_{\text{м.ном.}} = 55^{\circ} \text{ C}$, $x = 0.9$, $y = 1.8$.

Визначаємо відносне навантаження кожного ступеня. Для першого ступеня $K_1 = \frac{S_1}{S_{\text{ном.тр.}}} = \frac{1.50}{1.6} = 0.94$. Аналогічно визначаємо K_i для всіх ступенів, результати зводимо в таблицю 1. За точку відліку взято 0 годин (можна приймати будь-який час).

Задаємось початковим значенням перевищення температури масла над навколишнім середовищем θ_0 за умови, що трансформатор працює за циклічним графіком, наприклад, приймаємо $\theta_0 = 58^{\circ} \text{ C}$. Номінальне перевищення температури масла для системи охолодження М по ГОСТ 14209-97 $\theta_{\text{м.ном.}} = 55^{\circ} \text{ C}$

Перевищення температури масла на першому ступені при сталому навантаженні K знаходимо за формулою (1). Згідно з параметрами трансформатора

$$d = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_x} = \frac{26}{5.1} = 5.1, \text{ тоді } \theta_{\text{м}} = \theta_{\text{м.ном.}} \left(\frac{1 + dK^2}{1 + d} \right)^x = 55 \left(\frac{1 + 5.1 \times 0.96^2}{1 + 5.1} \right)^{0.9} = 51.48^{\circ} \text{ C}, \text{ а кін-}$$

цеве значення перевищення температури на першому ступеню –

$$\theta_{1\kappa} = \theta_{n-1} + (\theta_{ny} - \theta_{n-1})(1 - e^{\Delta t_n / \tau}) = 58 + (51.48 - 58)(1 - e^{-2/3}) = 54.83^{\circ} \text{C}.$$

Аналогічно, на другому ступеню

$$\theta_m = 55 \left(\frac{1 + 5.1 \times 0.70^2}{1 + 5.1} \right)^{0.9} = 34.24^{\circ} \text{C}; \theta_{2\kappa} = 54.83 + (34.24 - 54.83)(1 - e^{-2/3}) = 44.81^{\circ} \text{C}.$$

Перевищення температури обмотки над температурою масла на ступені 1

$$\theta_{об.1} = \theta_{об.н.} \times K^y = 40 \times 0.96^{1.8} = 36.93^{\circ} \text{C}$$

Перевищення температури обмотки над температурою масла на ступені 2

$$\theta_{об.2} = 40 \times 0.71^{1.8} = 21.83^{\circ} \text{C}$$

Температура обмотки в найбільш нагрітій точці для першого ступеня при температурі навколишнього середовища мінус 6⁰ С

$$\vartheta_{обм.н.н.т.} = \vartheta_{охол} + \theta_m + \theta_{обм.н.н.т.} = -6 + 54.83 + 36.93 = 85.76^{\circ} \text{C}$$

Розрахунки для всіх ступенів аналогічні, результати зведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Розрахунок перевищень температури масла і обмотки, а також температури обмотки

Ступінь	Тривалість ступеня	Відносне навантаження ступеня	Перевищення температури масла на ступені в установлених стані, °С	Перевищення температури масла в кінці ступеню, °С	Перевищення температури обмотки на ступені, °С	Температура найбільш нагрітої точки обмотки, °С	Середня температура обмотки на ступеню
1	2	0,96	51,48	54,83	36,93	85,76	85,88
2	2	0,71	34,24	44,81	21,83	60,64	73,20
3	2	0,78	38,36	41,67	25,46	61,13	60,89
4	2	1,05	59,42	50,31	43,84	88,15	74,64
5	2	1,30	82,97	66,20	64,23	124,44	106,30
6	2	1,14	67,40	66,79	50,77	111,55	118,0
7	2	1,19	71,59	69,12	54,40	117,52	114,54
8	4	1,22	75,29	72,12	57,59	123,72	120,62
9	2	1,17	70,38	71,28	53,35	118,62	121,17
10	2	1,10	63,92	67,69	47,74	109,44	114,03
11	2	0,91	47,98	58,10	33,89	85,99	97,72

З розрахунків видно, що початкове значення вихідне перевищення температури масла на початку розрахунку і на ступені 11 співпадають, тому повторно про-

водити розрахунок не потрібно. Якщо ці величини розходяться більше ніж на 10 – 15%, то необхідно задатися новим значенням початкового перевищення температури і повторити розрахунок.

Проміжні значення перевищення температури для будь-якого моменту часу можна визначають за виразом

$$\theta_t = \theta_0 + (\theta_y - \theta_0)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (19)$$

За результатами розрахунків будують графік перевищень температури масла, обмотки і температури найбільш нагрітої точки обмотки для всіх ступенів (Рис. 6).

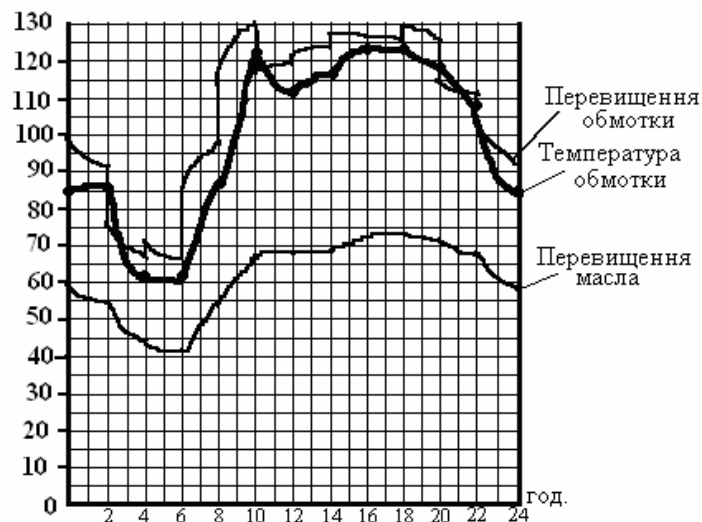


Рис. 6 – Перевищення температури масла і обмотки, температура обмотки

2.3. Розрахунок добового зношення трансформатора

Зношення трансформатора розраховують тільки для тих ступенів на яких середня температура обмотки перевищує 98⁰ С. На ступенях, де температура менша, зношення дорівнює 0.

Розглянемо 5-й ступінь. Для визначення зношення трансформатора на ньому знаходимо середню температуру обмотки протягом цього ступеня

$$\vartheta_{обм.сер.} = \vartheta_{обм.поч.} + \vartheta_{обм.кін.} = \frac{88.15 + 124.44}{2} = 106.30^0 \text{ С}$$

Відносне зношення трансформатора на першому ступені

$$F_{*i} = 2^{\frac{v_{об.і}-98}{6}} = 2^{\frac{106.3-98}{6}} = 3.48$$

Абсолютне зношення трансформатора протягом п'ятого ступеню, який триває 2 год. становить

$$F = 2 \times 3.48 = 6.96 \text{ год.}$$

Добовий знос трансформатора в годинах протягом доби визначається за формулою

$$F = \sum_{*i} F \times t \text{ год.}$$

Значення відносних та абсолютних зношень на всіх ступенях зведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Розрахунок зносу трансформатора

Ступінь	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Середня температура	85.88	73.20	60.89	74.64	106.30	118.0	114.54	120.62	121.17	114.03	97.72
Тривалість ступеня, год.	2	2	2	2	2	2	2	4	2	2	2
Відносне зношення	–	–	–	–	3.48	10.08	6.77	13.64	12.13	6.36	–
$F_{доб.} = \sum_{i=1}^n F_i \times t_i$ год.	–	–	–	–	6.96	20.16	13.54	54.56	24.26	12.72	–

Сумарне добове зношення ізоляції трансформатора при роботі за вказаним графіком складає 132.1 години, або як за 5.50 "нормальних" діб.

Для вибору трансформатора згідно з ГОСТ 14209-97 реальний графік навантаження перетворюємо в еквівалентний двоступінчатий. Для цього на заданому графіку проводимо горизонтальна лінія з ординатою, яка дорівнює $S_{н.т.}$, тобто лінію номінального навантаження.

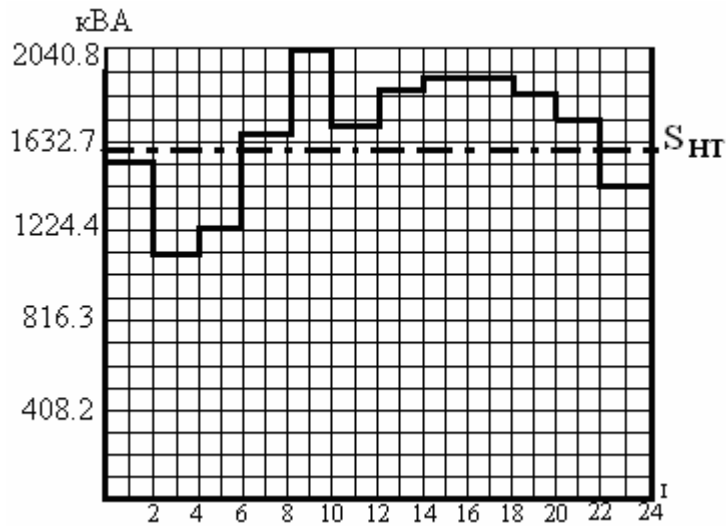


Рис. 3 – Графік навантаження підстанції

Пересіканням цієї лінії з графіком утворюються дві ділянки – де $S_i \leq S_{т ном}$ і де $S_i > S_{т ном}$.

Коефіцієнт початкового навантаження еквівалентного графіка визначають за виразом (16)

$$K_1 = \frac{1}{S_{Тном}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m S_i^2 \times \Delta t_i}{\sum_{i=1}^m \Delta t_i}} = \frac{1}{1.6} \times \sqrt{\frac{1.53^2 \times 2 + 1.12^2 \times 2 + 1.22^2 \times 2 + 1.43^2 \times 2}{2 + 2 + 2 + 2}} = 0.834$$

Попереднє значення коефіцієнта K_2 визначають за виразом (17)

$$K_2' = \frac{1}{S_{Тном}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n S_i^2 \times \Delta h_i}{\sum_{i=1}^n \Delta h_i}} = \frac{1}{1.6} \times \sqrt{\frac{1.68^2 \times 2 + 2.04^2 \times 2 + 1.71^2 \times 2 + 1.89^2 \times 2 + 1.91^2 \times 4 + 1.84^2 \times 2 + 1.73^2 \times 2}{2 + 2 + 2 + 2 + 4 + 2 + 2}} = 1.15$$

Значення K_2' порівнюють із значенням $0.9 K_{макс} = 0.9 \times S_{макс} / S_{т ном} = 0.9 \times 2040.8 / 1600 = 1.15$ вихідного графіка.

У даному випадку $K_2' = 0.9 K_{макс} = 1.15$, тому приймаємо $K_2 = 1.15$

Згідно з табл. 1.36 [3] при $K_1 = 0.834$, $h = 16$ годин $\nu = -6^\circ\text{C}$, $K_2 = 1.5$, що більше розрахункового K_2 – трансформатор відповідає умовам вибору.

Література

1. Электрическая часть станций и подстанций: Учебник для вузов / А. А. Васильев, И. П. Крючков, Е. Ф. Наяшков и др.; Под ред. А. А. Васильева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990;
2. Правила устройства электроустановок /Минэнерго СССР.– 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Неклепаев Б. Н. Крючков В.П. Электрическая часть станций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Уч. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. –М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
4. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник. – Вінниця: Нова книга, 2004. 656 с.
6. Проектирование электрической части станций и подстанций: Уч. пособие для вузов/ Ю. Б. Гук , В. В. Кантан, С. С. Петрова – Л.: Энергоатомиздат, 1985.

Додаток А

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

Кафедра "Електропостачання міст"

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до розрахунково - графічної роботи на тему**

**«Графіки навантажень, температурний режим та навантажувальна здатність
трансформаторів»**

Керівник _____(Воропай В. Г.)

Виконав студент 4 групи 4 курсу _____(Коваль В.В.)

Харків – 2008

Вихідні дані

Таблиця Б1 – Вихідні дані

Варіант	Активне навантаження споживачів, $P_{\text{макс}}$ МВт	Коефіцієнт потужності навантаження	Номер графіків навантаження	Літнє навантаження, % від зимового	Еквівалентна температура навколишнього середовища Θ_3/Θ_4 C°
1	17, 11	0.88	I, II	80	-3/17
2	32, 15	0.87	I, III	70	-4/18
3	34, 12	0.89	I, IV	60	-5/17
4	16, 25	0.92	II, III	90	-5/20
5	10, 30	0.85	II, IV	50	-2/22
6	14, 25	0.86	III, IV	65	-3/18
7	9.0, 13	0.87	I, II	70	-4/21
8	11, 17	0.88	I, III	80	-5/20
9	21, 18	0.93	I, IV	85	-3/22
0	12, 20	0.85	II, III	70	-3/18

Таблиця Б2 – Коригувальні коефіцієнти до вихідних даних

Передостання цифра номера залікової книжки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Коефіцієнт коригування активного навантаження, k_p	1.1	1.4	1.2	1.05	0.8	1.3	0.9	1.8	1.5	1.0
Те ж коефіцієнта потужності, k_k	1.0	1.05	0.95	1.0	1.0	1.05	0.99	0.98	1	0.96

Таблиця Б3 – Дані графіків навантаження

Години	Навантаження, % від максимального				Години	Навантаження, % від максимального			
	I	II	III	IV		I	II	III	IV
1	40	68	50	90	13	70	80	80	100
2	38	70	20	90	14	65	85	85	100
3	33	75	20	90	15	60	85	85	100
4	33	80	35	80	16	60	90	92	92
5	33	90	100	80	17	60	96	92	92
6	35	100	75	90	18	62	100	90	92
7	50	100	75	90	19	65	100	92	92
8	60	95	100	100	20	70	100	70	100
9	70	95	92	100	21	85	85	70	100
10	70	70	90	82	22	85	80	50	90
11	62	70	82	82	23	80	75	50	90
12	68	50	100	100	24	80	70	50	90

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи «Графіки навантажень, температурний режим та навантажувальна здатність трансформаторів» з курсу «**Електрична частина станцій та підстанцій**» (для студентів 3, 4 курсів денної і 4 курсу заочної форм навчання напряму 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» (0906 «Електротехніка») зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання»).

Укладачі: Воропай Валентина Григорівна,
Гаряжа Василь Миколайович,
Рум'янцев Дмитро Валерійович

Відповідальний за випуск доц. *Є. Д. Дьяков*

Редактор *М. З. Аляб'єв*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2010, поз. 244 М

Підп. до друку 08.07.2010 р.	Формат 60x84 1/16
------------------------------	-------------------

Друк на ризографі.	Ум. друк. арк. 1,0
--------------------	--------------------

Тираж 50 пр.	Зам. №
--------------	--------

Видавець і виготовлювач:
Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 731
від 19.12.2001